УДК 519.254

М. С. Павлов, С. В. Антоненко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ КЕРОВАНОГО ЛОКАЛЬНОГО ПОШУКУ

Розглянуто обчислювальну схему оптимізації мережі моніторингу стану підземних вод з використанням керованого локального пошуку на основі методу інтерполяції Сібсона.

Ключові слова: *керований локальний пошук, крігінг, інтерполяція Сібсона, метод природної околиці, оптимізація мережі моніторингу.*

Рассмотрена вычислительная схема оптимизации сети мониторинга состояния подземных вод с использованием управляемого локального поиска на основе метода интерполяции Сибсона.

Ключевые слова: *управляемый локальный поиск, интерполяция Сибсона, метод естественных окрестностей, оптимизация сети мониторинга.*

Optimization of the existing long-term groundwater monitoring networks can reduce the maintenance cost. This process should have minimal negative impact on the network in terms of monitoring information. Depending on the number of wells, finding the group of sites where measurements could be estimated with the lowest interpolation error can be a combinatorial problem. Combinatorial optimization problem can be solved by Guided Local Search algorithm. In this paper we consider the computational scheme for optimizing existing groundwater level monitoring network located in Kryvyi Rih, Dnipropetrovsk region, Ukraine, using a natural neighbor based guided local search. To find the groups of the redundant sites Python application for the network design optimization was developed. The solution was found for the network with 46 monitoring wells. The number of wells to remove was set to 7. The number of iterations was predefined. For guided local search number of iterations was set to 20. Number of iterations for local search was set to 100. Natural Neighbor interpolation requires the computation of the Voronoi diagram with interpolation point and without interpolation point, but the concept behind it is pretty straightforward. It is a weighted average interpolation technique, where the points used to estimate the value of an attribute at location x are the natural neighbors of x. By means the ones which share the edge of Voronoi cell with x. Guided local search algorithm is trying to

© Павлов М. С., Антоненко С. В., 2019.

avoid certain components which were found in local optima to force exploration elsewhere, basically using the components which haven't been used much in high-quality solutions found before. Based on the results further development of the tool for the groundwater level monitoring network optimization is planned.

Keywords: *guided local search, natural neighbor interpolation, groundwater level monitoring network optimization.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Оптимізація довгострокових мереж моніторингу підземних вод з великою кількістю свердловин може скоротити витрати органів управління водними ресурсами. Щільність мережі та частота вимірювань безпосередньо впливають на витрати. Зменшення кількості свердловин має мінімально впливати на інформативність мережі. Залежно від кількості свердловин вичерпний пошук рішення може бути неприйнятний за часом. У такому разі задачу оптимізації мережі можна розглядати як задачу комбінаторної оптимізації. Евристичні процедури оптимізації можуть скоротити час на пошук прийнятного рішення. Питання розробки технологій з використанням метаевристичних алгоритмів є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Авторами роботи [1] було проведено просторовий аналіз рівня ґрунтових вод з використанням 31 свердловини, за результатами якого було знайдено точки спостереження, які можуть бути виключені з мережі, оскільки їх внесок у моделювання розподілу рівня води незначний. Процедура, описана в цій роботі, може бути використана не тільки для перевірки інтерполяційної моделі, але і для оцінки та оптимізації мережі спостереження. У роботі [2] на прикладі мережі з 32 свердловин було перевірено запропоновані моделі оптимізації вибору підмножини з 17 станцій з використанням алгоритму імітації відпалу та статистичної ентропії. Використання евристичного алгоритму мурашиної колонії в задачі оптимізації мережі моніторингу було запропоновано у роботі [3].

Мета роботи. Метою роботи є розробка нової обчислювальної технології оптимізації мережі моніторингу стану підземних вод з використанням керованого локального пошуку на основі методу інтерполяції Сібсона.

Основна частина. Сформулюємо основні теоретичні положення.

Алгоритм природної околиці, розроблений Р. Сібсоном [4], використовує принципи *діаграми Вороного*. Нехай для відомих

значень у точках $p \in X$ евклідового простору X побудована діаграма Вороного $VD(X)$ (рис. 1).

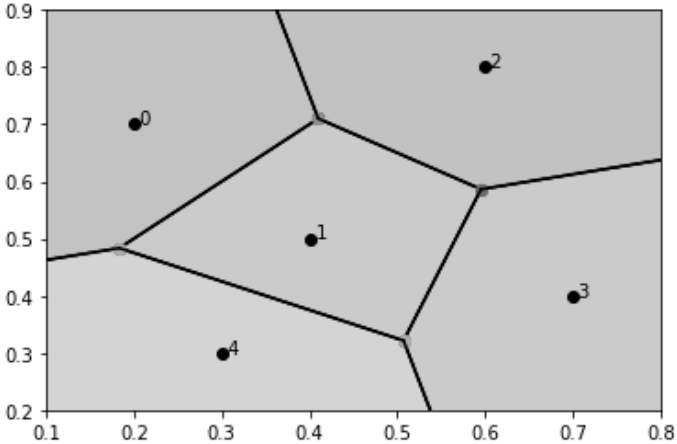

Рисунок 1 – Діаграма Вороного

Елементом діаграми V_{p_i} буде множина точок, відстань від яких менша або дорівнює відстані до точки p_i , ніж до будь-якої іншої точки p_j в X, $i \neq j$. Відрізки, які утворюють межі між елементами діаграми $V_p \in VD(X)$, є перпендикулярними бісекторами до відрізків, які з'єднують точки $p \in X$. Тобто межі на діаграмі Вороного являють собою всі точки на площині, які рівновіддалені від двох найближчих точок p_i, p_j. Природними сусідами точки $x \notin X$ будуть точки в X, елементи діаграми яких будуть змінені у разі додавання x до $VD(X)$. Таким чином створюється новий елемент діаграми V_x , який захоплює частку ваги w (площі) сусіднього елемента (V_{pi}), тобто $VD^+(X) = VD(X) \cup \{x\}$.

$$w_i(x) = \frac{S(V_{pi} \cap V_x{}^+)}{S(V_x{}^+)} \ , \tag{1}$$

w_i – вага, присвоєна i-му елементу відносно x.

Таким чином, інтерпольоване значення функції f у точці x знаходиться за формулою:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} w_i(x)\, z_i, \ , \ \sum_{i=1}^{n} (w_i) = 1, \tag{2}$$

де z_i – виміряне значення в i-ій локації;

w_i – вага, присвоєна z_i відносно x.

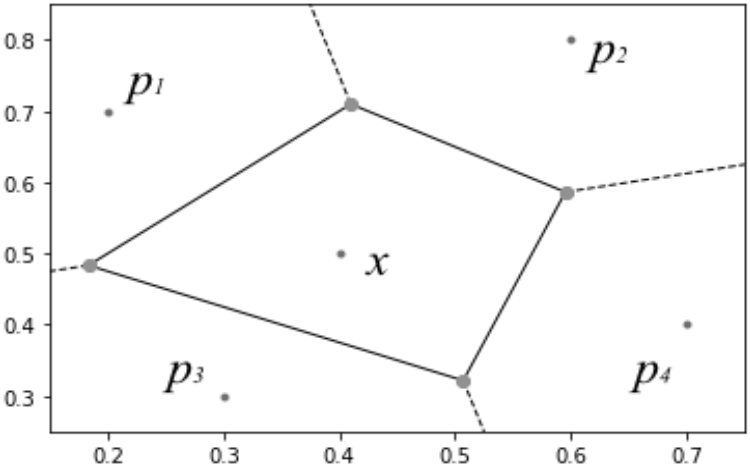

Рисунок 2 – Діаграма Вороного для точки x

Залежно від кількості свердловин, задачу оптимізації мережі можна розглядати як задачу комбінаторної оптимізації. *Керований локальний пошук* належить до класу алгоритмів пошуку із забороною (*табу*). Рішенням комбінаторної оптимізації є набір деяких компонент. У задачі оптимізації мережі моніторингу кожна точка спостереження є компонентою рішення у просторі можливих рішень. Кожне рішення можна представити у вигляді бінарного вектора, довжина якого дорівнює кількості точок моніторингу, де одиницями будуть позначені свердловини, кандидати на видалення з мережі, а всі інші точки – нулями. Алгоритм намагається запобігти повторному попаданню в локальні оптимуми шляхом нарахування штрафів компонентам, з яких ці локальні оптимуми складаються. Тобто метод примушує шукати нові рішення, а не вертатися знову до вже відомих. Функція вартості рішення обчислюється шляхом оцінки помилки інтерполяції заданого показника для кожної компоненти та підрахунком середьоквадратичної помилки. Нараховані штрафи у поєднанні з фактичною вартістю рішення складають скориговану вартість рішення.

На початку алгоритму генерується випадкове рішення. Штрафи поточних компонент зазвичай дорівнюють нулю, але можуть бути накладені додаткові умови. Метод сходження на вершину застосовується на кожній ітерації, тобто відбувається постійне переміщення в напрямку зменшення вартості рішення шляхом заміни

однієї компоненти на іншу з допустимих варіантів та перерахунку вартості. Якщо вартість нового рішення краща за найменшу попередньо встановлену, рішення зберігається. Якщо ж скоригована вартість нового рішення краща за найменшу попередньо встановлену скориговану вартість, нове рішення використовується на наступній ітерації сходження на вершину замість попереднього. Сходження завершується по закінченні встановленої кількості ітерацій, та компонентам рішення з найменшою скоригованою вартістю нараховуються штрафи. Штрафи нараховуються тільки тим компонентам, які мають найбільше відношення значення помилки інтерполяції у точці компонента до кількості нарахованих штрафів. Таким чином, перевага надається не тільки рішенням з мінімальною вартістю, але й рішенням, компоненти яких ще не використовувались у попередніх високоякісних рішеннях, що призводить до уникнення відомих локальних оптимумів. Алгоритм завершується по досягненні встановленої кількості ітерацій.

За допомогою можливостей бібліотек мови програмування Python розроблено програмний модуль до інформаційної системи, описаної в роботі [5], який дозволяє користувачу будувати діаграми Вороного до заданого набору точок та використовувати керований локальний пошук на основі інтерполяції Сібсона для оптимізації мережі моніторингу.

Для тестування було використано дані з мережі із 46 свердловин (рис. 3), розташованій поблизу хвостосховища у м. Кривий Ріг, Україна. Для оптимізації використовувались медіанні значення відстані до води для кожної свердловини. Набір даних включає: географічні координати (тобто довгота, широта) і значення рівня води відповідної свердловини. Дані моніторингу збиралися за календарний рік, спостереження проводились 6, 12, 18, 24, 30 числа кожного місяця.

Побудована діаграма Вороного для мережі моніторингу зображена на рис. 4.

Рисунок 3 – Розташування свердловин (помічені крапками)

Рисунок 4 – Діаграма Вороного

Основні характеристики вибірки з даних наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Базові характеристики вибірки

Кількість свердловин	Мінімальна відстань до води (м)	Максимальна відстань до води (м)	Середня відстань до води (м)
46	0,385	9,705	4,6

У табл. 2 наведено результати роботи алгоритму для пошуку 7 свердловин на видалення з мережі моніторингу із заданою кількістю ітерацій керованого локального пошуку та алгоритму сходження до вершини. У табл. 3 наведено фактичні та прогнозовані медіанні значення відстані до води для цих свердловин.

Таблиця 2

Результати роботи алгоритму для пошуку 7 свердловин на видалення

Кількість свердловин (на видалення)	Кількість ітерацій (керований локальний пошук)	Кількість ітерацій (сходження до вершини)	RMSE
7	20	100	0,078

Таблиця 3

Результати роботи алгоритму для пошуку 7 свердловин на видалення по свердловинах

№ свердловини	Значення (фактичне)	Значення (прогнозоване)	Помилка
1124	3,82	3,769	0,003
589	3,73	3,621	0,012
588	3,72	3,871	0,023
10	4,12	4,1	0,0004
7	4,12	4,177	0,003
3	4,415	4,392	0,001
9	4,305	4,333	0,001

Висновки та перспективи подальших досліджень. У даній роботі представлено нову обчислювальну технологію з використанням алгоритму керованого локального пошуку на основі методу інтерполяції Сібсона, яка дозволяє виконувати оптимізацію мереж гідрогеологічного моніторингу, та продемонстровано результати пошуку для 7 свердловин на видалення з мережі. Хоча евристичні

алгоритми пошуку не гарантують знаходження глобального оптимуму, вони дозволяють значно скоротити час на пошуки прийнятного рішення. На підставі отриманих результатів планується подальша розробка системи оптимізації мережі гідрогеологічного моніторингу.

Бібліографічні посилання

1. Theodossiou N., Latinopoulos P. Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the kriging methodology. *Environmental Modelling and Software*. 2006. 21. P. 991–1000.

2. Nunes L.M., Cunha M.C., and Ribeiro L. Groundwater monitoring network optimization with redundancy reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2004. V. 130. No. 1. P. 33–43.

3. Li Yuanhai, Hilton A.B.C. Reducing Spatial Sampling in Long-Term Groundwater Monitoring Networks Using Ant Colony Optimization. *International Journal of Computational Intelligence Research.* 2005. V. 1, No. 1. P. 19–28.

4. Sibson R. A brief description of natural neighbour interpolation. *In V Barnett ed., Interpreting Multivariate Data*. Wiley, New York, USA. 1981. P. 21–36.

5. Павлов М. С., Антоненко С. В., Доровська І. О. Інформаційна технологія оптимізації мережі моніторингу стану підземних вод з використанням генетичного алгоритму. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. Дніпро, 2018. Т. 22. С. 3–15.

Надійшла до редколегії 12.11.2019.